

Nghiên cứu nguồn gốc sự biến đổi hàm lượng khí CO₂ và động học quá trình thành tạo nhũ đá trong hệ thống hang động Vườn Quốc gia Phong Nha - Kẻ Bàng phục vụ phát triển du lịch bền vững

Study on the origins of change of CO₂ content and kinetics of stone formation inside the Phong Nha - Ke Bang National Park serving sustainable tourism development

Trần Ngọc^{a,b*}, Trịnh Anh Đức^c
Tran Ngoc^{a,b*}, Trinh Anh Duc^c

^a*Viện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam*

^a*Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam*

^b*Khoa Khoa học Tự nhiên, Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam*

^b*Faculty of Natural Sciences, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam*

^c*Viện Hóa học, Viện Hàn lâm Khoa học Việt Nam*

^c*Institute of chemistry, Vietnam Academy of Science and Technology*

(Ngày nhận bài: 16/9/2020, ngày phản biện xong: 19/9/2020, ngày chấp nhận đăng: 20/10/2020)

Tóm tắt

Hàm lượng khí CO₂ trong lòng các hang động đá vôi là yếu tố quan trọng quyết định đến nhiều quá trình địa hóa. Các quá trình trao đổi giữa khí CO₂ trong không khí và CO₂ trong nước chiết cũng như trong thạch nhũ có thể thúc đẩy quá trình ăn mòn các nhũ đá, vì vậy sẽ làm thay đổi cảnh quan, diện mạo và thành tạo các nhũ đá bên trong hang. Kết quả nghiên cứu cho thấy các hang động Phong Nha - Kẻ Bàng có khả năng lưu tích khí CO₂ bên trong lòng hang. Kết quả xác định nguồn gốc của sự biến đổi hàm lượng CO₂ trong lòng các hang động và những phân tích động học của quá trình thành tạo các nhũ đá sẽ là cơ sở khoa học để đề xuất các giải pháp cho phát triển du lịch bền vững đối với các hang động vùng Phong Nha - Kẻ Bàng.

Từ khóa: Hàm lượng CO₂; nhũ đá; thẩm thấu; kết tủa.

Abstract

The CO₂ content in the limestone caves is an important determinant of many localization processes. The exchange process between CO₂ in the air and CO₂ in the extracted water as well as limestone can promote the process of erosion like rock, so it will change the landscape, appearance, and formation of the stalactites inside the cave. Research results show that: Phong Nha - Ke Bang caves have the capacity to store CO₂ inside the cave. The results have identified the origin of the change of CO₂ content in the caves and the kinetic analysis of the process of forming rock formations to provide a scientific basis to propose the solutions for sustainable tourism development for caves in Phong Nha - Ke Bang region.

Keywords: CO₂ content; stone masonry; osmotic; precipitation.

* *Corresponding Author:* Tran Ngoc; Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, Vietnam; Faculty of Natural Sciences, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam

Email: daotaoqb@gmail.com, tranngoc11@duytan.edu.vn

1. Giới thiệu

Vườn Quốc gia Phong Nha - Kẻ Bàng (VQG PNKB) là nơi hội tụ nhiều tính chất đa dạng của thiên nhiên như: địa chất, địa mạo, khí hậu, sinh thái môi trường... Tất cả những điều đó đã làm cho nơi đây trở nên có vị trí quan trọng đặc biệt cho khoa học liên quan đến các hang động và bảo tồn đa dạng sinh học không chỉ ở Việt Nam mà cả thế giới [1]. Các kết quả nghiên cứu về môi trường, khí hậu hang động đều cho thấy: môi trường vi khí hậu trong các hang động có sự trao đổi mạnh mẽ với môi trường bên ngoài. Mọi biến đổi khí hậu hay môi trường bên ngoài đều có tác động đáng kể đến môi trường cũng như diện mạo và thành tạo các nhũ đá bên trong hang [2]. Nếu xét về góc độ Sinh - Hóa thì khí hậu trong vùng (khí hậu bề mặt) ẩm lên và ẩm ướt hơn, quá trình phong thủy hóa các kim loại khỏi đá gốc sẽ được đẩy mạnh dẫn đến sự tăng hàm lượng các kim loại trong thạch nhũ. Cơ chế của quá trình này là sự tăng áp suất riêng phần của khí CO₂ (pCO₂) giữa các khe đất và giảm độ pH trong dung dịch đất là hệ quả từ việc tăng tốc độ quá trình phân hủy chất hữu cơ trong đất cũng như trong nước ngầm. Khi quá trình phân hủy chất hữu cơ được đẩy mạnh, hàm lượng O₂ trong đất sẽ giảm thấp, dẫn đến giảm thế ô xi hóa khử, tạo điều kiện giải phóng các kim loại nặng khỏi pha kết tủa vào pha hòa tan. Mặt khác, khi thời tiết ẩm và ẩm hơn, chế độ thủy văn của các tầng nước ngầm cũng hoạt động mạnh hơn, cũng làm tăng quá trình hòa tan và vận chuyển kim loại trong môi trường. Các kim loại nặng chuyển trạng thái từ kết tủa trong đất đá sang trạng thái hòa tan, chúng được vận chuyển bởi nước ngầm đến vị trí thành tạo nhũ đá và bị giữ lại trong cấu trúc thạch nhũ trong quá trình hình thành của chúng [2,3].

Hàm lượng khí CO₂ trong lòng hang là một yếu tố quan trọng quyết định đến nhiều quá trình địa hóa. Quá trình hòa tan của khí CO₂ có

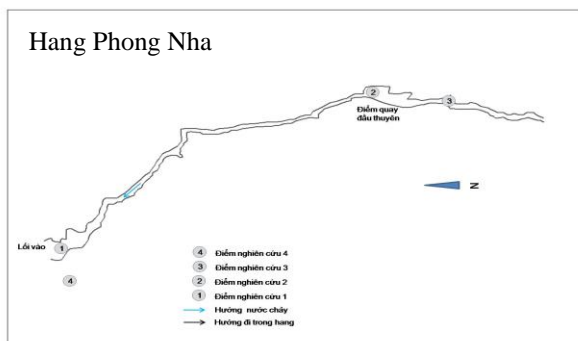
nguồn gốc từ khí quyển bên ngoài (bên trên) hay từ đất vào trong nước thấm thấu qua các kẽ nứt đá vôi tạo thành acit cacbonic (H₂CO₃), đây là tác nhân chính làm hòa tan đá vôi và góp phần tạo thành các hang động. Thông thường, hàm lượng khí CO₂ trong đất (trong khoảng 1000 - 10000 ppm) cao hơn nhiều trong khí quyển (khoảng 380 ppm) và chiếm thành phần chính của khí CO₂ tích tụ trong lòng hang. Ngoài ra, việc khai thác du lịch với lượng người thăm quan đông có xu hướng làm tăng hàm lượng CO₂ trong không khí lòng hang [2, 3]. Do hang đá vôi, các quá trình trao đổi khí giữa CO₂ trong không khí và CO₂ trong nước chiết cũng như đá vôi có thể thúc đẩy quá trình ăn mòn thạch nhũ đá vôi [4,5]. Nếu hang là kín (chỉ có một cửa), quá trình hòa tan đá vôi xảy ra cho đến khi toàn bộ khí CO₂ được hòa tan hết. Nếu hang hở (có nhiều cửa hoặc có sông ngầm), hệ môi trường trong lòng hang sẽ duy trì quá trình tiếp xúc giữa nước thấm thấu và CO₂ xuất xứ từ đất hay các nguồn gốc khác như con người và động vật sống/thăm quan trong lòng hang, dẫn đến làm tăng tổng lượng cacbonat hòa tan. Trên thực tế, các hang động thường tồn tại các khu vực được coi là hệ mở/hở nằm ở phía trên gần cửa hang, ở những khu vực sâu hơn bên trong, môi trường trở thành hệ kín. Điều này có nghĩa là không phải chỗ nào trong lòng hang cũng xảy ra quá trình hòa tan đá vôi mà có những khu vực có nồng độ khí CO₂ thấp, dẫn đến khí CO₂ thoát ra từ nước thấm thấu và quá trình kết tủa calcite xảy ra. Do vậy, sự biến đổi hàm lượng CO₂ trong lòng hang sẽ ảnh hưởng rất lớn đến sự phân bố thành tạo của nhũ đá, măng đá mới [2,3,4].

Từ trước đến nay, ở Việt Nam nói chung và vùng Phong Nha - Kẻ Bàng nói riêng chưa có khảo sát nào về môi trường vi khí hậu cũng như nguồn gốc sự biến đổi hàm lượng các khí nhà kính trong lòng các hang động (đặc biệt là khí CO₂), cũng như về cơ chế xuất hiện, tích trữ,

chuyển hóa của các khí này trong môi trường đặc biệt như trong lòng các hang động đá vôi này. Trong bài báo này chúng tôi muốn trình bày các kết quả nghiên cứu xác định nguồn gốc của sự biến đổi hàm lượng CO_2 trong lòng hang động cùng với các kết quả phân tích động học của quá trình thành tạo các nhũ đá, măng đá trong lòng hang. Các kết quả thu được sẽ giúp ích trong việc bảo tồn hệ thống hang động tại đây, cũng như đóng góp cho sự hiểu biết của con người về nguồn gốc, cơ chế chuyển hóa loại khí này trong môi trường vi khí hậu của hang động đá vôi nói chung.

2. Phương pháp thực nghiệm

Phương pháp mà chúng tôi sử dụng trong nghiên cứu này là sự kết hợp của thực địa quan trắc tại chỗ và lấy mẫu phân tích trong phòng thí nghiệm, bao gồm phân tích nồng độ khí, phân tích đồng vị bền, cùng với việc xử lý các số liệu trên các phần mềm chuyên dụng.



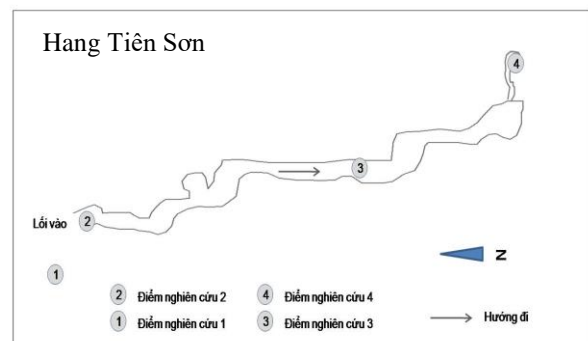
Hình 1. Bình đồ hang Phong Nha và các điểm quan trắc, lấy mẫu

Địa điểm được chọn để nghiên cứu là các hang động đã và đang khai thác du lịch là Phong Nha, Tiên Sơn và Thiên Đường thuộc hệ thống hang động của VQG PNKB - di sản thiên nhiên thế giới. Trên cơ sở bình đồ các hang động và địa hình thực tế, chúng tôi đặt các vị trí quan trắc và lấy mẫu phù hợp như ở Hình 1, 2, 3.

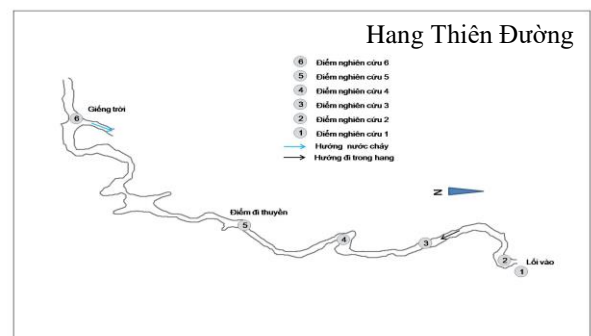
Thời gian quan trắc và lấy mẫu tại thực địa được chọn vào mùa hè ở thời điểm khách du lịch đến đông là các ngày 30/4 - 1/5 (từ năm 2014 đến năm 2017).

Thiết bị sử dụng để quan trắc liên tục nhiệt độ, độ ẩm, hàm lượng CO_2 , pCO_2 được thực hiện trên thiết bị: CO_2 meter Sense CO_2 + RH/T Monitor w. Relay - cSense CO_2 , Temp & %RH Monitor w. Relay & Data-Logger Kit. Lấy mẫu và phân tích đồng vị bền $\delta^{13}\text{C}$ bằng thiết bị G2101-i (Picarro Inc, Santa Clara, CA, USA).

Để tìm hiểu sâu hơn về nguồn gốc của khí CO_2 trong môi trường, chúng tôi sử dụng mô hình Keeling trên cơ sở phân tích mối quan hệ giữa hai thông số là $1/\text{pCO}_2$ và tỷ lệ đồng vị $\delta^{13}\text{C}$. Nguyên tắc của phương pháp này là đồng vị bền $\delta^{13}\text{C}$ trong khí quyển có một giá trị xác định, trong khi $\delta^{13}\text{C}$ có xuất xứ từ các nguồn khác (chẳng hạn từ môi trường đất hay hô hấp của con người) sẽ có $\delta^{13}\text{C}$ thay đổi khác hẳn [4,5,6].



Hình 2. Bình đồ hang Tiên Sơn và các điểm quan trắc, lấy mẫu



Hình 3. Bình đồ hang Thiên Đường và các điểm quan trắc và lấy mẫu

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Phân tích nguồn gốc thay đổi hàm lượng khí CO_2 và đồng vị bền $\delta^{13}\text{C}$

Kết quả phân tích hàm lượng khí trung bình trong lòng các hang động hiện đang khai thác du

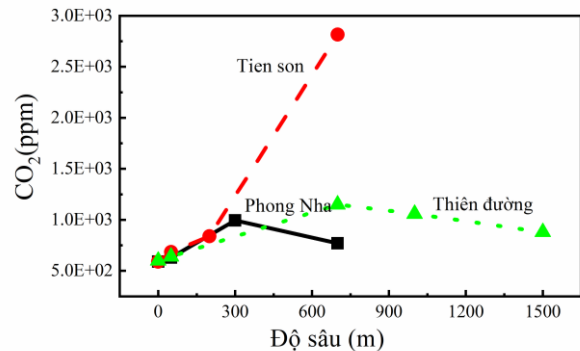
lich như: Hang Thiên đường, Phong Nha và Tiên Sơn thuộc hệ thống hang động VQG PNKB, được mô tả trong Bảng 1. Kết quả này cho thấy, hàm lượng khí CO₂ bên trong tất cả các hang động đều cao hơn bên ngoài hang. So sánh một cách tương đối kết quả quan trắc giữa các hang cho thấy: hàm lượng khí CO₂ trong hang Tiên Sơn thay đổi nhiều hơn và cao hơn so với các hang còn lại (có điểm cao đến 2901 ppm, gấp 3 lần giá trị cao nhất ở các hang khác). Tỷ lệ đồng vị bên trong hang cũng có xu hướng cao hơn bên ngoài hang. Tỷ lệ đồng vị bền δ¹³C tại hang Tiên Sơn có sự phân bố phức tạp nhất, giá trị δ¹³C đạt thấp đến cỡ -25,7‰. Như vậy, với hang có một lối vào và không có sông ngầm (hang kín) như hang Tiên Sơn có hàm lượng CO₂ trung bình cao chứng tỏ có sự tích tụ khí CO₂ bên trong lòng hang. Nguyên nhân của sự tích tụ khí CO₂ là do hang chỉ có 1 cửa ra vào lại không có dòng chảy nên quá trình đối lưu không khí giữa bên trong hang và bên ngoài hang không mạnh. Còn với các hang có nhiều cửa hay có dòng chảy của sông ngầm như hang Phong Nha hay hang Thiên Đường, không khí bên trong liên tục được luân chuyển và trao đổi với bên ngoài, hàm lượng CO₂ trong lòng hang vì vậy ít bị tích tụ, phân bố đều hơn giữa các điểm theo chiều sâu của hang.

Bảng 1. Hàm lượng CO₂ và đồng vị bền δ¹³C-CO₂

Hang động	CO ₂ (ppm)	δ ¹³ C (‰)
Thiên Đường	607 – 989	-20,6 – -15,9
Phong Nha	795 – 1025	-20,4 – -18,4
Tiên Sơn	805 – 2901	-25,7 – -17,1
Ngoài hang	465	-18,7

Khảo sát chi tiết theo các vị trí đặc biệt trong lòng hang (như ở cửa hang, điểm có khách tham quan nhiều, cuối điểm tham quan...) cho thấy hàm lượng các khí như CO₂ không giống nhau giữa các vị trí (hình 4), xu hướng thay đổi hàm lượng CO₂ không tuân theo quy luật tuần tự từ bên ngoài vào bên trong hang mà hàm

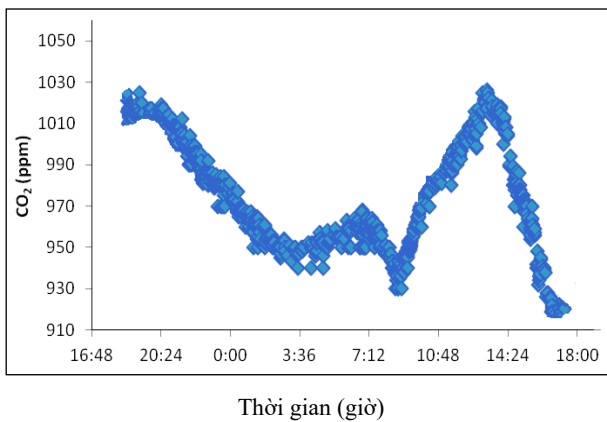
lượng CO₂ ở các khu vực có khách tham quan tập trung đông thường cao hơn các khu vực không có khách tham quan và cao hơn ở các vị trí sát cửa hang.



Hình 4. Sự biến đổi hàm lượng CO₂ theo độ sâu trong các hang Phong Nha, Thiên Đường và Tiên Sơn

Khi có sự tích tụ CO₂, quá trình cân bằng cacbonat - bicacbonat bị dịch chuyển về hướng bicacbonat, tức là hòa tan đá vôi. Nói cách khác, trong hang kín, quá trình thành tạo nhũ đá sẽ chậm hơn ở trong các hang thông hay hang có sông ngầm. Trường hợp cụ thể ở hệ thống hang động VQG PNKB thì có thể thấy, thạch nhũ trong hang Tiên Sơn cũ hơn thạch nhũ trong Phong Nha hay Thiên Đường. Tại Phong Nha và Thiên Đường, quan sát được rất nhiều thạch nhũ đang trong quá trình thành tạo nhưng ở Tiên Sơn thì không.

Kết quả quan trắc liên tục khí CO₂ và một số điều kiện môi trường khác như nhiệt độ không khí, độ ẩm và nhiệt độ bốc hơi cho thấy: trong khi các điều kiện khác gần như không thay đổi (nhiệt độ và độ ẩm) thì hàm lượng khí CO₂ thay đổi rõ rệt giữa ngày và đêm (hình 5). Hàm lượng CO₂ đạt cực tiểu vào giữa đêm về sáng, đạt cực đại sau buổi trưa (khoảng 14h chiều) và có sự phân tầng về hàm lượng khí CO₂ theo độ cao. Tại nền hang, hàm lượng CO₂ có giá trị cao nhất, càng lên cao trong lòng hang, CO₂ càng giảm, khi độ cao trên 1m thì giá trị CO₂ trở nên ổn định, không tăng lên nữa.



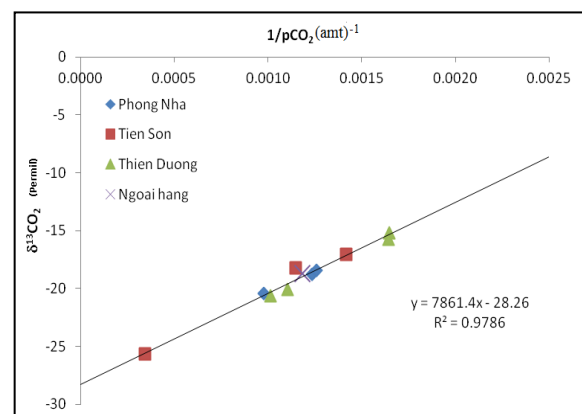
Hình 5. Sự biến đổi hàm lượng CO₂ theo thời gian trong động Thiên Đường (liên tục trong một ngày đêm)

Kết quả quan trắc liên tục trong thời gian một ngày đêm (từ 17h ngày hôm trước đến 18h ngày hôm sau) trên Hình 5 cho thấy, khoảng thời gian có hàm lượng CO₂ tăng cao trùng khớp với thời điểm khách du lịch tham quan nhiều nhất (ban ngày từ 8h sáng đến 16h chiều) hoặc khi mà mật độ khách tham quan tăng lên gần trong khu vực đặt máy quan trắc thì chỉ số CO₂ tăng mạnh. Như vậy, kết quả này cho thấy không thể loại bỏ yếu tố con người tham gia làm biến đổi hàm lượng khí CO₂ trong không khí trong hang [4, 5].

Tuy nhiên, chúng tôi chỉ khẳng định rằng không thể loại bỏ yếu tố con người trong các nguyên nhân dẫn đến sự biến đổi hàm lượng CO₂ trong lòng hang, vì cũng rất có thể sự tăng lên của CO₂ trong lòng hang đến từ các quá trình tự nhiên. Theo Fernandez và cộng sự (2015) trong một khảo sát liên tục ngày và đêm trên một số hang động đá vôi khác trên thế giới đã kết luận rằng: hàm lượng CO₂ có xu hướng tăng lên vào ban ngày và giảm đi vào ban đêm [6]. Thực tế, chúng tôi nghiêng về cách giải thích là các hoạt động du lịch có làm tăng quá trình tích tụ khí CO₂ trong lòng hang nhưng so với các quá trình tự nhiên, vai trò của hoạt động du lịch vẫn là thứ yếu. Vì như kết quả quan trắc ở đây cho thấy, ở hang Tiên Sơn nơi có CO₂ tích tụ lớn nhất nhưng thực tế thì lượng khách du lịch tham quan trong ngày lại thấp hơn so với ở hang Phong Nha và Thiên Đường. Tuy

nhiên điều này cũng đã được thảo luận thông qua yếu tố cấu trúc của từng hang có ảnh hưởng rất lớn đến sự đối lưu (trao đổi) không khí trong và ngoài hang.

Trong trường hợp các hang động đang đưa vào khai thác du lịch ở Phong Nha - Kẻ Bàng, hàm lượng CO₂ trong hang là sản phẩm của quá trình hòa trộn giữa CO₂ khí quyển, CO₂ khuếch tán từ đất đá và nước thấm thấu và CO₂ do con người hô hấp. Để tìm hiểu sâu hơn về nguồn gốc của khí CO₂ trong môi trường, chúng tôi sử dụng mô hình Keeling để phân tích mối quan hệ giữa hai thông số là $1/pCO_2$ và tỷ lệ đồng vị $\delta^{13}C$. Các kết quả phân tích khí đưa vào mô hình Keeling cho ở Hình 6. Đường hồi quy tuyến tính cho giá trị $\delta^{13}C = -28.26\%$, giá trị này tương ứng với điều kiện khí CO₂ trong hang có nguồn gốc từ nước thấm thấu và/hoặc hô hấp, mà không hề có sự đóng góp của CO₂ trong khí quyển [6]. Với các hang mà kết quả khảo sát cho giá trị nằm gần gốc của đường hồi quy như hang Tiên Sơn thì CO₂ bên trong lòng hang ít chịu ảnh hưởng của CO₂ khí quyển hơn với các hang có kết quả khảo sát nằm xa gốc đường hồi quy (như động Thiên Đường). Nói cách khác, không khí bên trong động Thiên Đường có trao đổi với khí quyển mạnh hơn là không khí trong hang Tiên Sơn. Ở hang Tiên Sơn, khí CO₂ đến chủ yếu từ quá trình khuếch tán và quá trình hô hấp diễn ra bên trong lòng hang.



Hình 6. Áp dụng mô hình Keeling xác định nguồn gốc của khí CO₂ trong một môi trường của các hang Phong Nha, Thiên Đường và Tiên Sơn

Thông qua các kết quả phân tích này, ta thấy nguồn gốc của sự biến đổi hàm lượng CO₂ đến từ sự biến đổi nội tại trong lòng hang (CO₂ khuếch tán từ đất đá và nước thấm thấu và CO₂ do con người hô hấp) chứ hoàn toàn không có sự đóng góp của CO₂ trong khí quyển. Như vậy khi lượng CO₂ tăng lại bị tích tụ trong hang sẽ làm tăng hệ số về giới hạn môi trường, đồng thời làm giảm khả năng chịu tải thực tế của khu vực di sản, điều đó ảnh hưởng lớn đến du lịch bền vững [7, 8].

3.2. Phân tích động học các quá trình hình thành các nhũ đá

Để hiểu rõ hơn cơ chế xuất hiện, tích trữ, chuyển hóa của khí CO₂ và vai trò của chúng trong quá trình thành tạo hay phá hủy các nhũ đá, măng đá, chúng ta cần phân tích sâu hơn mối liên hệ giữa đồng vị δ¹³C có trong nước chiết, thạch nhũ và mẫu đá gốc. Các kết quả phân tích đồng vị δ¹³C có trong các mẫu nước chiết, mẫu thạch nhũ và mẫu đá gốc cho ở Bảng 2. Các kết quả phân tích đồng vị δ¹³C trong các mẫu nước, mẫu thạch nhũ và mẫu đá gốc cho thấy có sự khác biệt lớn giữa mẫu đá gốc với các mẫu nước và thạch nhũ. δ¹³C trong mẫu đá

gốc dao động trong khoảng 0.3 đến 0.7‰, trong khi trong mẫu nước và mẫu thạch nhũ, kết quả δ¹³C thấp hơn nhiều trong khoảng từ -12 đến -9‰. Điều này chứng tỏ C kết tủa trong thạch nhũ không chỉ có nguồn gốc từ đá vôi gốc mà còn có thể là kết hợp với C của môi trường (nước chiết). Các bon của môi trường được sinh ra từ quá trình phát triển của tầng thực vật phủ phía trên địa hình karste là thành phần chính trong nhóm chức CO₂ kết hợp với Ca tạo thành thạch nhũ thông qua phản ứng hóa học sau:



Với giá trị δ¹³C trong thạch nhũ (có thời gian thành tạo từ hàng ngàn đến hàng vạn năm) tương đương với giá trị δ¹³C trong nước thu thập tại chỗ tại thời điểm hiện tại. Điều đó cho thấy điều kiện sinh thái môi trường ở VQG PNKB hiện nay không khác nhiều với điều kiện môi trường sinh thái trong quá khứ [2,5,6]. So sánh giá trị tuyệt đối của δ¹³C trong thạch nhũ với δ¹³C trong đá gốc và δ¹³C trong các hệ thực vật hiện nay cho thấy δ¹³C trong thạch nhũ là sự kết hợp của cả hai nhóm các bon có nguồn gốc vô cơ và hữu cơ [6].

Bảng 2: Phân tích đồng vị mẫu nước, mẫu thạch nhũ và đá gốc (‰ VPDB) [9, 10]

	Thiên đường			Phong Nha			Tiên Sơn		
	Cửa	Giữa	Trong	Cửa	Giữa	Trong	Cửa	Giữa	Trong
Đồng vị δ ¹³ C trong mẫu nước									
δ ¹³ C		-1,82	-0,79	-6,21	-5,73	-6,54			
Đồng vị δ ¹³ C trong mẫu thạch nhũ và đá gốc (Chữ in <i>ngiêng</i> là mẫu đá, in <i>đứng</i> là thạch nhũ)									
δ ¹³ C	-0,47	-10,96	-9,94	0,62	-11,20	0,30	-11,36	-10,41	-10,11

Như vậy, so sánh đối chiếu với dữ liệu thời tiết khí hậu (lượng mưa và nhiệt độ) và dữ liệu phân bố thảm thực vật rõ ràng có sự đóng góp của điều kiện môi trường, thảm thực vật bề mặt vào quá trình hình thành và phát triển thạch nhũ trong các hang động ở VQG PNKB.

Tóm lại, kết quả phân tích vi cấu trúc đã cho thấy có yếu tố sinh học tham gia trong quá trình

hình thành thạch nhũ trong các hang động nghiên cứu, điều đó đã cho thấy điều kiện sinh thái môi trường ở Phong Nha - Kẻ Bàng hiện nay không khác nhiều với điều kiện môi trường sinh thái trong quá khứ (cổ khí hậu). Cho đến nay, sự biến đổi khí hậu toàn cầu (lũ lụt, hạn hán, nhiệt độ tăng, các hiện tượng khí hậu cực đoan...) tác động chưa nhiều đến biến đổi hệ

sinh thái và môi trường của khu vực VQG PNKB. Các tác động làm thay đổi các chỉ số về khí hậu chủ yếu là do biến đổi về môi trường ở nội khu vực tạo ra, mà chủ yếu là do các hoạt động của con người tạo ra.

4. Kết luận

Các kết quả phân tích và đo đạc tại chỗ đã cho thấy bức tranh chi tiết về môi trường cũng như tác động của con người đến hang động ở đây. Các kết quả cho thấy hang động Phong Nha - Kẻ Bàng có khả năng lưu tích CO₂ và địa hình của hang động quyết định nhiều đến khả năng lưu tích loại khí này bên trong lòng hang.

Kết quả nghiên cứu phân tích động học các quá trình thành tạo nhũ đá trong các hang động vùng Phong Nha - Kẻ Bàng cho thấy các tác động làm thay đổi các chỉ số về khí hậu chủ yếu là do biến đổi môi trường nội khu vực tạo ra, trong đó phải kể đến các hoạt động khai thác du lịch thời gian gần đây. Khai thác du lịch là một trong các nguyên nhân dẫn đến xu hướng làm tăng hàm lượng CO₂ trong không khí lòng hang. Sự tăng hàm lượng của khí CO₂ trong lòng hang sẽ thúc đẩy quá trình bào mòn nhũ đá mạnh hơn, điều đó dẫn đến cảnh quan tự nhiên của cả hệ thạch nhũ, vách đá sẽ thay đổi theo chiều hướng tiêu cực. Đây là cơ sở khoa học để đề xuất các giải pháp hạn chế sự gia tăng hàm lượng CO₂ trong lòng các hang động hướng tới phát triển du lịch bền vững đối với các hang động vùng Phong Nha - Kẻ Bàng. Để phát triển du lịch một cách bền vững, cần sử dụng một số biện pháp để giảm bớt sự tích tụ khí CO₂ trong lòng hang, đặc biệt là ở các hang chỉ có một cửa (như hang Tiên Sơn).

Lời cảm ơn: Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn Ban Quản lý Vườn Quốc gia Phong Nha - Kẻ Bàng đã hợp tác cùng khảo sát

với nhóm. Chương trình nghiên cứu được tài trợ một phần bởi Chương trình Phát triển Khoa học & Công nghệ tỉnh Quảng Bình, đề tài cấp tỉnh, mã số 08-KHCN-QB 2014.

Tài liệu tham khảo

- [1] Trần Nghi (chủ biên), Di sản thiên nhiên thế giới - Vườn quốc gia Phong Nha - Kẻ Bàng, Quảng Bình, Việt Nam, NXB ĐHQG Hà Nội (2009).
- [2] Trinh Anh Duc and Javier Garcia Guinea, Vulnerability, pressures, and protection of karst caves and their speleothems in Ha Long Bay, Vietnam, *Environmental Earth Sciences*, ISSN 1866-6280-DOI 10.1007/s12665-013-2884-z, (2013).
- [3] Trinh Anh Duc, Microscopic analysis of Speleothem in Ha Long Bay, a proxy for regional environmental assessment, *The Tenth International Symposium on Southeast Asian Water Environment* (2012).
- [4] Gams I, Nicod J, Sauro M, Julian E and Anthony U, *Environmental change and Human Impacts on the Mediterranean karsts of France, Italy and the Dinaric Region* (1993)
- [5] P.W. Williams (ed.) *Karst Terrains, Environmental Changes and Human Impacts*. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt, p. 59-98(2013).
- [6] A.Fernandez-Cortes, S. Cuezva, M. Alvarez-Gallego., Subterranean atmospheres may act as daily methane sinks, *Nature communications*. DOI: 10.1038/ncomms8003 (2015).
- [7] J.M Calaforra, A. Fernandez-Cortes, F.Sanchez-Martos, J.Gisbert and A.Pulido-Bosch., Environmental control for determining human impact and permanent visitor capacity in a potential show cave before tourist use., <https://www.jstor.org/stable/44520669>, *Environmental Conservation*, Cambridge University Press., Vol. 30, No. 2 (2003), pp. 160-167.
- [8] N Tran, TL Nguyen, DT Nguyen, M Dang, XT Dinh., Tourism carrying capacity assessment for Phong Nha - Ke Bang and Dong Hoi, Quang Binh Province., repository.vnu.edu.vn, (2017).
- [9] Trần Ngọc, Trịnh Anh Đức, Võ Văn Trí, Bùi Khắc Sơn, Trần Xuân Mùi., Nghiên cứu các điều kiện vi khí hậu trong các hang động Phong Nha - Kẻ Bàng phục vụ phát triển du lịch bền vững, Báo cáo tổng kết đề tài cấp Tỉnh, mã số 08-KHCN-QB, (2016).
- [10] Trịnh Anh Đức, Trần Ngọc, Vũ Đức Lợi, Nguyễn Thị Minh Nguyệt, Trịnh Hồng Quân., Nghiên cứu nhũ đá trong hang động vườn quốc gia Phong Nha - Kẻ Bàng phục vụ đánh giá biến đổi khí hậu và môi trường khu vực, Báo cáo tổng kết đề tài NAFOSTED, mã số 104.99-2014.41, (2017).